中国生态农业学报 2016 年 1 月 第 24 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 47−55

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150679

日光温室甜椒起垄内嵌式基质栽培根区温度日变化特征*

傅国海 刘文科**

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室 北京 100081)

摘 要 针对我国北方地区日光温室冬春季低温胁迫、土壤连作障碍、单产低和水肥资源利用率低等问题，本文设计了一种新型的栽培方法——起垄内嵌式基质栽培方法(soil ridge substrate-embedded cultivation, SRSC)，并在早春季节，研究了两种模式的 SRSC[嵌槽式垄(SRSC-P)和嵌膜(铁丝网槽支撑)式垄(SRSC-W)]及土垄(SR)和单一基质槽垄(NPG)栽培下的甜椒幼苗根区温度的日变化特征。结果表明，日光温室内栽培垄根区温度与温室内、外的气温变化呈显著正相关，室内和栽培垄根区的平均温度分别比室外提高 8.07 ℃和 10.93 ℃，夜间分别提升 9.90 ℃和 14.81 ℃。在夜间低温阶段，SRSC-W 维持根区较高温度的能力相对优于 SR 和 SRSC-P，其根区平均温度分别比 SR 和 SRSC-P 高 1.34 ℃和 0.52 ℃；在白天高温阶段，SR、SRSC-P、NPG、SRSC-W 最高温度平均值分别为 28.06 ℃、27.21 ℃、29.93 ℃、26.05 ℃，SRSC-W 抗高温效果最佳，NPG 抗高温效果最差。阴天条件下，栽培垄的蓄热保温性能比晴天条件下差。SR 白天和夜间的中心根区平均温度皆高于外侧，但 SRSC-P 和 SRSC-W 白天外侧温度高，夜间中心根区温度高。栽培垄北部根区温度高于南部根区温度，具有空间差异性，其中 SRSC-W 栽培模式的南部中心根区温度和北部中心根区温度差异相对于其他处理最小。此外，SRSC-W 中心根区温度变化滞后时间最长，温度缓冲能力强。总之，SRSC-W 栽培方法维持早春季节夜间甜椒根区温度能力和对低温及高温胁迫的缓冲性最强，且成本低，在日光温室抗低温生产中具有较好的应用前景。

关键词 日光温室 起垄内嵌式基质栽培 蓄热保温 根区温度 昼夜温度
中图分类号: S625.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0047-09

Diurnal change in root zone temperature of soil ridge substrate-embedded cultivation method for sweet pepper in solar greenhouse*

FU Guohai, LIU Wenke**

(Institute of Environment and Sustainable Agricultural Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract In order to deal with the production problems associated with low temperature stress in winter and early spring, continuous cropping obstacles, low yields and low utilization efficiencies of water and fertilizer in solar greenhouses in North China, a novel cultivation method named ‘soil ridge substrate-embedded cultivation’ (SRSC) was designed and its performance was investigated. An investigation on root zone temperature of sweet pepper seedlings in two types of SRSC patterns [SRSC-P (polyethylene groove embedded in soil ridge) and SRSC-W (plastic film with wire mesh as support embedded in soil ridge)], SR (soil ridge) and NPG (naked polyethylene groove) were conducted in early spring. The results showed that the dynamic changes of ridge root zone temperatures were significantly positively correlated with both inside and outside temperatures of greenhouse. Moreover, daily mean temperatures inside greenhouse and in ridge root zone were increased by 8.07 ℃ and 10.93 ℃, respectively, than temperature outside greenhouse. The effect of greenhouse was more remarkable at night,

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2013AA103001)和国家自然科学基金项目(31201661)资助
** 通讯作者: 刘文科，主要从事设施园艺营养与光温生物学研究。E-mail: liuwenke@caas.cn
傅国海，主要从事设施作物根区环境温度方面的研究。E-mail: haifengzhisheng@126.com
收稿日期: 2015−06−11 接受日期: 2015−11−05
* This work was supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program, No. 2013AA103001) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31201661).
** Corresponding author, E-mail: liuwenke@caas.cn
Received Jun. 11, 2015; accepted Nov. 5, 2015

temperatures inside greenhouse and in ridge root zone enhanced by 9.9 ℃ and 14.81 ℃, respectively, compared with outside temperature. Based on the data analysis, the performance of root zone temperature in terms of preservation of SRSC-W was better than that of SR and SRSC-P at night. And average night temperature were increased by 1.34 ℃ and 0.52 ℃, respectively, compared with those of SR and SRSC-P. The highest root zone temperatures of SR, SRSC-P, NPG and SRSC-W were 28.06 ℃, 27.21 ℃, 29.93 ℃ and 26.05 ℃, respectively, at daytime. This suggested that SRSC-W had the best buffering capacity for high temperature while NPG had the worst buffering capacity. The performance of SRSC in terms of heat storage and preservation under cloudy conditions was worse than that under sunny conditions. Root zone temperature in ridge center of SR was higher than that in lateral ridge at both daytime and nighttime. On the contrary, SRSC-P and SRSC-W had higher lateral temperatures in the daytime and higher center temperature at night. Root zone temperature in north part of ridge was higher than that of south part, and temperature difference was the smallest between south and north under SRSC-W condition. In addition, the lag time for dynamic change in root zone temperature in ridge center was the longest under SRSC-W condition due to powerful temperature buffer capacity. In short, the effect of preservation temperature in root zone of SRSC-W was the best with strongest temperature buffer capacity during low temperature period among all treatments. SRSC-W had a broad prospect for application with low cost and most stable performance of heat storage and preservation.

Keywords Solar greenhouse; Soil ridge substrate-embedded cultivation; Heat storage and preservation; Root zone temperature; Diurnal temperature

设施栽培在我国蔬菜和其他重要经济作物的反季节和跨地区种植中占有重要地位[1]，截至2012年底，我国设施栽培面积约4×10^6 hm^2，其中设施蔬菜瓜果产量约2.67×10^8 t，占蔬菜瓜果总产量的34%。由于设施栽培高产高效的特点，其已逐渐成为中国农业中最有活力的新兴产业之一[2]。日光温室作为我国北方冬春季蔬菜栽培的主要场所，目前栽培面积已经超过1×10^6 hm^2，成为我国北方设施蔬菜生产中最为重要的形式之一[3]。但是，在我国北方地区的日光温室栽培过程中，由冬春季环境低温造成的日光温室内的低温胁迫问题已成为影响日光温室作物生产的瓶颈。温度是影响植物产量和品质的关键生态环境因素，决定着植物地上部的生长和根系的水肥吸收，对植物的生长发育、光合作用和蒸腾作用产生重要影响[4]。

日光温室内低温胁迫问题主要是由日光温室本身结构特征的限制和外界低温环境的影响相互作用造成的。日光温室的面积大，环境调控能力弱，主要通过被动地吸收太阳能来提高温室内土壤和空气温度[5]。日光温室对低温的抵抗能力较差，当外界环境温度较低时，往往因为得不到热量补充而产生低温胁迫，进而导致作物产量的下降和品质的降低。此外，除冬春季环境低温造成温室低温胁迫，中午时段有时也会出现短时的高温胁迫。目前，针对日光温室冬春季低温胁迫问题，有以下方式可以有效缓解：1)通过优化结构提高日光温室的蓄热保温性能[6]；2)通过利用太阳能加热[7]，如主动蓄放热系统[8]等方式提高日光温室内的气温；3)通过作物根区电加热[9]、起垄覆膜[10]等方式，提高根区温度。虽然上述方式能够有效地缓解日光温室冬春季低温问题，但是在实际应用过程中存在诸多弊端，如能源消耗量大、经济性差、操作复杂等。在日光温室生产过程中，气温和根区温度是影响作物生长的两个重要的温度因素。有研究表明，植物的生长发育对根区温度比空气温度更加敏感[11−13]。当空气温度适合光合作用时，根区低温成为抑制根区生理活动和植物生长的主要因素[14−15]。有报道表明，温室种植黄瓜，当根区温度低于 12 ℃时，幼苗生长开始出现明显受阻[16]，低根区温度降低了根系呼吸、水肥吸收和根系生长，影响根系的气体交换和移植后存活[17−18]。Gosselin 等[19]研究发现，提高根区温度能够增加低温环境下室内种植的辣椒产量；Jones 等[20]研究认为根区加热可以抵消夜间低温对番茄产量的影响。上述研究说明提升根区温度是解决日光温室低温胁迫的有效手段。

由于提升根区温度是解决日光温室低温胁迫的有效途径[21]，我们以维持根区较高温度为核心，提出一种新的栽培方法——起垄内嵌式基质栽培方法(soil ridge substrate-embedded cultivation)，简称 SRSC，即将土壤栽培与无土栽培相结合，利用土垄包被基质栽培槽，覆盖地膜后利用滴灌进行蔬菜栽培。土壤稳定的结构使其具有良好的蓄热保温性能和温度缓冲性能，而且土壤温度变化滞后于外界环境温度变化[22]，能够为植物根系提供更加稳定的根区环境温度，即通过土垄蓄集更多的太阳能提高根区温度并增强根区基质的稳定性和缓冲能力；无土栽培发挥了其高产的优势，且无土栽培中基质取代了根区土壤环境，能够解决传统土壤栽培中水分、空气、养分的供应矛盾[23]，以及由土壤栽培带来的土壤连作障碍等问题[24]，此外，采用滴灌系统，能够减少水肥资源的浪费，提高了作物产量[25]。

本研究在建立的嵌槽(SRSC-P)和嵌膜(SRSC-W)两种形式的 SRSC 新型栽培方法的基础上, 以甜椒(*Capsicum annuum* L.)为试验作物, 研究对比包括传统土垄(SR)和单一 PE 基质栽培槽(NPG)在内的 4 种不同栽培方法的蓄热保温能力强弱及其根区温度的日变化特征, 为 SRSC 新型栽培方法的实际应用提供理论支持和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验设计

SRSC 新型栽培方法将土壤栽培与无土栽培结合, 且不同于传统的地上筑槽基质栽培, 不但充分发挥无土栽培的高产高效优势, 还充分利用了土垄的蓄热保温性能, 且大大节省了建筑材料的使用成本, 方便操作。我们提出将特别设计的 PE 基质栽培槽(侧面下方打孔)或铁丝网槽+膜(侧面下方打孔)嵌在一定规格的土垄中, 即首先将特别设计的 PE 基质栽培槽或铁丝网槽+膜南北摆放整齐, 装入按比例混合均匀的栽培基质(草炭∶蛭石∶珍珠岩=1∶1∶1), 然后在栽培槽四周按照一定的标准培土起垄, 最终将栽培槽嵌在土垄中, 实现二者的结合。培垄完成后, 覆盖地膜, 设置滴灌, 能显著提高地温和减少水肥流失[26–27]。SRSC 新型栽培方法将土壤、基质栽培槽、基质、地膜、滴灌系统整合, 结合了土壤栽培和无土栽培的各自优势, 还可以达到以下效果: ①限制根系空间, 有效吸收利用水肥; ②基质用量少, 消毒处理便捷; ③栽培装置底部密封, 提高水肥利用率; ④侧面开孔, 增加通气性和土壤养分利用; ⑤结合滴灌系统使用, 减少水肥资源投入。其结构及参数如图 1 所示:

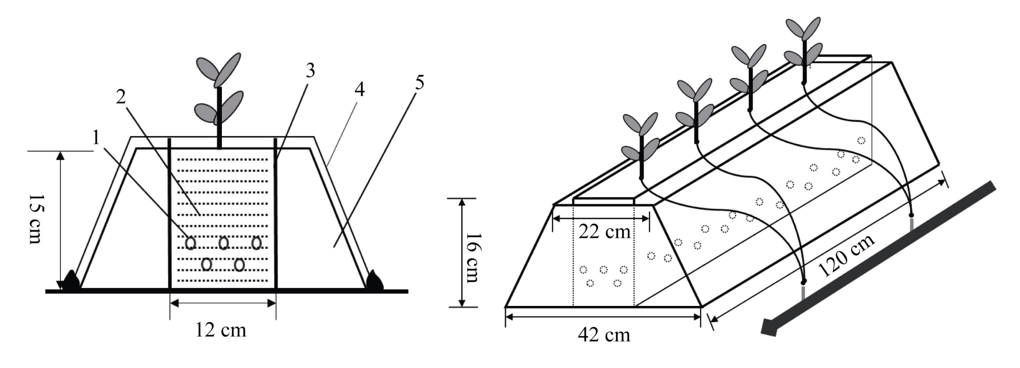


图 1　土壤起垄内嵌式基质栽培方法(SRSC)横切面图(左)和俯视图(右)

Fig. 1　Cross section (left) and aerial view (right) of a novel soil ridge substrate-embedded cultivation (SRSC) method for solar greenhouse

1: 通气孔; 2: 基质; 3: 基质槽; 4: 地膜; 5: 土壤。1: Venthole; 2: Substrate; 3: Groove; 4: Plastic film; 5: Soil.

本试验设计了两种不同形式的栽培槽, 一种是利用 PE 基质栽培槽内嵌(SRSC-P), 另一种利用铁丝网槽(内置塑料薄膜)内嵌(SRSC-W), 目的是比较基质栽培槽材质对蓄热保温能力的影响, 以及寻求廉价的实用性材料。根据实际生产及试验需求(保证根系生长的同时, 将根限制在一定空间, 以提高养分的吸收利用效率), SRSC 新型栽培方法的 PE 基质栽培槽规格设置为长×宽×高=120 cm×12 cm×16 cm, 厚度为 2 mm, 并于侧面距底部 5 cm 处打两行孔, 孔径 1 cm, 左右孔距 5 cm, 上下孔距 2.5 cm, 交叉排布(见图 1)。另一种栽培槽是铁丝网嵌膜基质栽培槽, 铁丝网减少了成本投入, 网孔有利于热量的传导, 网孔孔径 2.5 cm, 内嵌塑料薄膜, 长、宽、高与 PE 基质栽培槽相同, 在与 PE 基质栽培槽相同的位置打孔, 孔距孔径相同。设置 SRSC 栽培垄行距为 67 cm, 栽培垄底部宽 42 cm, 顶部宽 22 cm, 高度 15 cm。此外, 分别设置规格参数与 SRSC 栽培垄相同的土垄栽培行(SR)和单一 PE 基质槽栽培行(NPG), 研究 4 种不同栽培方法下甜椒根区温度的日变化特征。

试验小区内共设置 14 个栽培垄, 栽培垄为南北走向, 南北方向长度为 2.4 m。在试验小区东、西两端各设置 1 个保护行, 中间 12 行为处理行, 共设置 4 个处理, 每个处理设置 3 次重复。处理自东向西依次为 SR、SRSC-P、NPG、SRSC-W。

1.2　试验材料

试验在 2015 年 3 月 14—19 日在位于北京市顺义区大孙各庄镇试验基地的日光温室中进行, 试验用温室长 60 m, 跨度 8 m, 脊高 3.8 m。试验小区长 10 m, 宽 3 m, 最南端距温室南底脚 1.5 m。日光温室夜间采用覆盖保温被的保温措施, 保温被开闭的时间分别为 7:00 和 18:00。试验作物选择甜椒, 品种为‘海丰 16 号’。甜椒采取穴盘育苗, 三叶一心时定植, 株距 30 cm, 定植时间为 3 月 14 日。

试验采用国产的智能多点土壤温湿度记录仪(精度: ±0.05 ℃)测定各个测点的昼夜温度。

1.3 测定方法

试验共设置 44 个温度测点。其中 2 个测点分别设置在日光温室内部和外部，测定日光温室内部空气温度和外界环境温度，测点设置要避光通风，避免太阳辐射干扰。栽培垄的温度测点设置：首先 SR、SRSC-P 和 SRSC-W 的温度测点在距垄最南端 0.6 m，栽培垄中心位置 10 cm 深处和距该点 7 cm 外侧(与槽隔开 1 cm，防止槽壁温度变化对测点的影响过大)设置，每条垄设置 2 个测点，共设置 18 个测点；其次，NPG 只设置中心根区处的温度测点，相对位置与其他 3 种处理相同，每条垄设置 1 个测点，共设置 3 个测点。数据采集频率为 1 次·20min^{-1}，探究温度的时间变化规律。其次，在距各栽培垄最南端 1.8 m 的位置，与栽培垄南部中心根区位置相对应设置温度测点，共设置 21 个测点，探究温度的空间变化规律。根据试验用日光温室保温被开闭时间，本试验将白天定义为 7:00—18:00，夜间为 18:00—7:00(翌日)。试验研究甜椒苗期根区温度的时间和空间变化规律，故各选取较有代表性的 4 个昼夜的温度数据进行分析。选取 2015 年 3 月 14 日 15:00 至 18 日 15:00 的温度数据，分析温度的时间变化规律；选取 2015 年 3 月 15 日 17:00 至 19 日 17:00 的温度数据，分析温度空间变化规律。其中，3 月 16 日为阴天，其他时间为晴天。

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 8.2 进行作图和统计分析。

2 结果与分析

2.1 栽培垄根区温度与室内、室外温度变化的关系

由图 2 可知，4 种栽培垄根区平均温度与日光温室内部温度随室外温度的变化而变化。采用 SAS 软件对根区平均温度与日光温室内部、外部温度进行相关性分析，根区平均温度与日光温室内和室外温度的相关系数相同(R^2=0.7, P<0.000 1)，即根区平均温度与日光温室内、外温度呈极显著正相关关系。4 个昼夜中，根区平均温度与日光温室内、外平均温度分别为 20.77 ℃、17.91 ℃和 9.84 ℃，日光温室对根区温度和室内温度分别提升了 10.93 ℃和 8.07 ℃，且白天室内温度(21.11 ℃)和根区温度 (21.64 ℃)分别比室外温度(15.19 ℃)高 5.92 ℃、6.45 ℃，而夜间室内温度(15.03 ℃)和根区温度(19.94 ℃)分别比室外温度(5.13 ℃)高 9.90 ℃、14.81 ℃，夜间温差较大，说明日光温室对栽培垄和室内温度的提升效果明显，且在夜间低温环境下更加明显。中午时段，当外界环境温度较高时，根区最高温度(27.76 ℃)却低于室内最高温度(29.83 ℃)，说明栽培垄对高温具有一定的缓冲作用。日光温室内、外温度的最低温度和最高温度分别出现在 6:00 左右和 14:00 左右，根区最低温度和最高温度分别出现在 8:00 左右和 16:00 左右，根区温度的变化滞后于室内、外温度变化，滞后时间平均为 2 h。由图 2 还可以看出，第 2 天阴天天气情况下，室内、外及栽培垄温度都较低

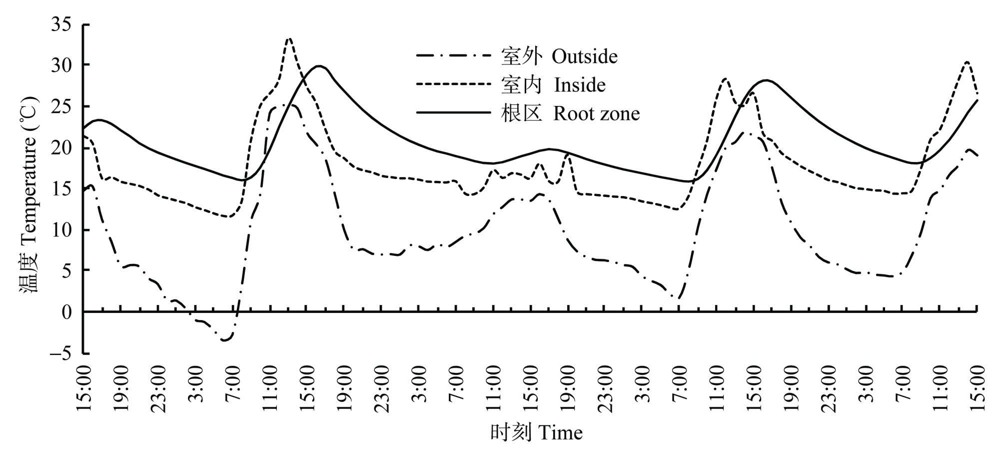


图 2 日光温室栽培垄根区温度与室内、外温度的变化

Fig. 2 Changes of ridge root zone temperature, inside temperature and outside temperature of solar greenhouse

且无明显变化，说明在低温环境下栽培垄起到的蓄热保温效果并不明显。

2.2 4 种栽培垄中心根区温度的变化及其差异

由图 3 可知，4 个栽培垄中心根区温度变化是有差异的。4 个昼夜中 SR、SRSC-P、NPG、SRSC-W 4 种栽培垄根区平均最低温度分别为 16.33 ℃、17.03 ℃、17.25 ℃、17.40 ℃，即 SRSC-W>NPG>SRSC-P>SR，可知 SRSC-W 抵御极低温的能力最强，SR 抵御极低温能力最弱；4 个昼夜中 SR、SRSC-P、NPG、SRSC-W 4 种栽培垄根区平均最高温度分别为 28.06 ℃、

27.21 ℃、29.93 ℃、26.05 ℃，即 NPG>SR>SRSC-P>SRSC-W，可知 SRSC-W 的高温缓冲能力最好，NPG 缓冲能力最弱。4 个昼夜中 SR、SRSC-P、NPG、SRSC-W 4 种栽培垄根区平均温度分别为 20.32 ℃、20.53 ℃、21.54 ℃、20.7 ℃，白天平均温度分别为 21.71 ℃、21.27 ℃、22.57 ℃、21.03 ℃，夜间平均温度分别为 19.01 ℃、19.83 ℃、20.57 ℃、20.35 ℃，可知 NPG 的蓄热保温能力优于其他处理，但在第 2 和第 4 个波峰处 NPG 根区温度超过 30 ℃，其高温缓冲能力差，对作物生长不利；SR 的蓄热能力好，但保温能力较差；SRSC-W 的保温性能较好，在夜间平均温度分别比 SR 和 SRSC-P 高 1.34 ℃和 0.52 ℃，能够有效缓冲夜间低温环境。栽培垄中心根区最低温度出现在 8:00 左右，最高温度出现在 17:00 左右，分别选取每天 6:00—8:00 和 15:00—17:00 时段的温度，以其平均值分别做低温及高温环境下的差异性分析。可以得到：低温环境下，4 个处理之间的根区温度差异显著，SRSC-W 根区温度显著高于其他处理；高温环境下，NPG 根区温度显著高于其他处理，缓冲高温能力差，SRSC-W 根区温度显著低于其他处理，缓冲高温能力强。

由图 4 可知，在晴天条件下，夜间栽培垄与室内气温温差为正值，栽培垄处于放热阶段，说明在夜间低温环境下，栽培垄能够有效维持根区较高温度，缓冲环境低温胁迫，且比较发现 SRSC-W 比 SR 和 SRSC-P 效果好，夜间温差大；白天栽培垄与室内气温温差为负值，室内气温上升较快，而栽培垄的缓冲性能使其温度上升较慢，栽培垄处于吸热阶段，比较发现 SRSC-W 白天高温阶段根区温度相对较低，温差较小，说明其有较强的温度缓冲性。比较蓄放热时间可以发现栽培垄放热时间长于吸热时间。在阴天条件下，栽培垄根区温度始终高于室内温度，

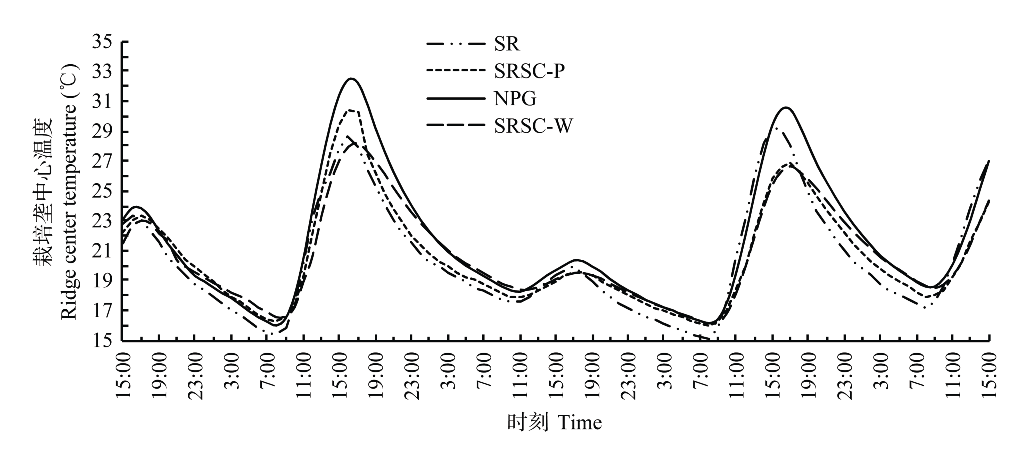


图 3　日光温室 4 种栽培垄中心根区温度的变化

Fig. 3　Changes of root zone temperatures in the center of four kinds of ridges in solar greenhouse

SR、SRSC-P、NPG 和 SRSC-W 分别指土垄、嵌槽式垄、单一基质槽垄和嵌膜(铁丝网槽支撑)式垄，下同。SR, SRSC-P, NPG and SRSC-W mean soil ridge, polyethylene groove embedded in soil ridge, naked polyethylene groove and plastic film embedded in soil ridge (wire mesh as support). The same below.

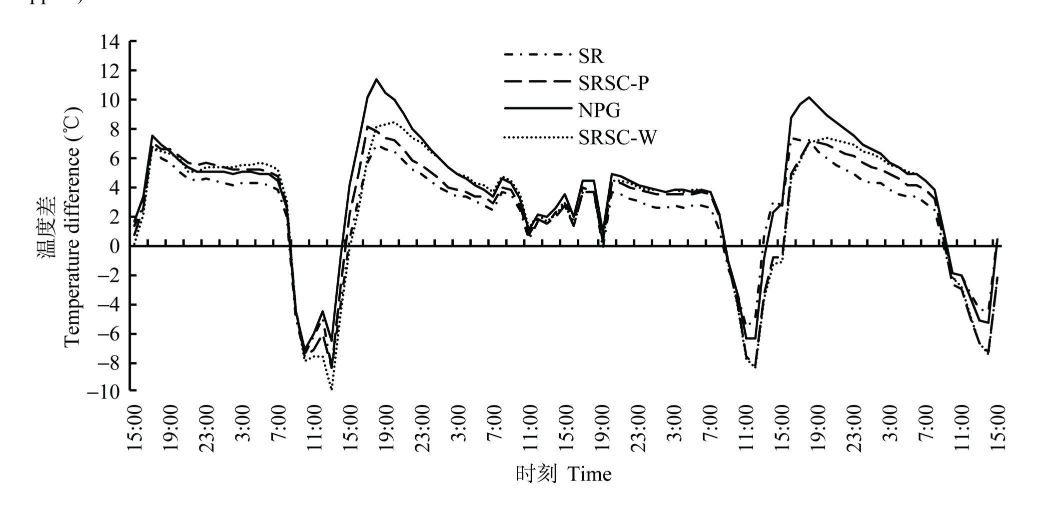


图 4　日光温室 4 种栽培垄中心温度与室内气温温差

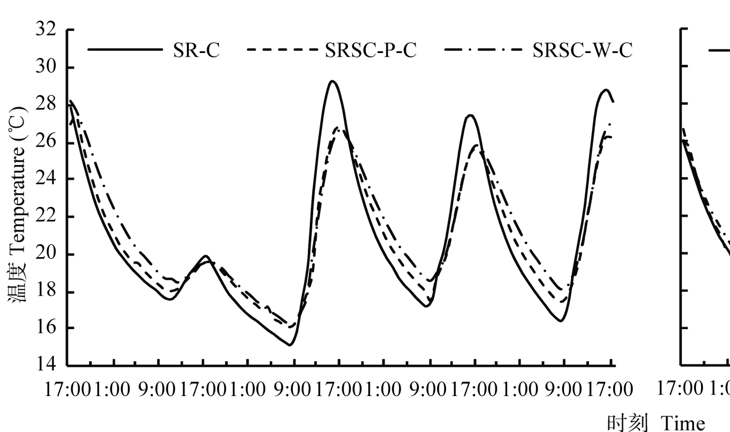
Fig. 4　Differences between root zone temperatures of four kinds of ridges and inside air temperature in solar greenhouse

即阴天条件下室内温度得不到有效提升，但在夜间栽培垄依然能够有效保持根区温度。

2.3 不同栽培模式的栽培垄根区内、外部及南北方向的温度差异

2.3.1 不同栽培模式垄内、外的温度差异

由图 5 可知 SR、SRSC-P 和 SRSC-W 中心(C)及外侧(L)的温度变化。SR、SRSC-P 和 SRSC-W 外侧的平均最低温度分别为 16.06 ℃、16.79 ℃、17.15 ℃，中心平均最低温度分别为 16.60 ℃、17.19 ℃、17.78 ℃，可知 SRSC-W 的外侧和中心的最低温度最高，且各处理中心最低温度高于外侧最低温度。SR、SRSC-P 和 SRSC-W 3 个处理外侧平均最高温度分别为 27.74 ℃、26.80 ℃、26.53 ℃，中心平均最高温度分别为 28.50 ℃、26.76 ℃、26.94 ℃，可知 SRSC 的外侧和中心的最高温度明显低于 SR，各处理中心最高温度高于或接近外侧最高温度。SR、SRSC-P 和 SRSC-W 3 个处理外侧白天平均温度分别为 22.08 ℃、21.79 ℃、21.86 ℃，中心根区白天平均温度分别为 22.21 ℃、21.06 ℃、21.27 ℃。SR、SRSC-P 和 SRSC-W 外侧夜间平均温度分别是 18.56 ℃、19.12 ℃、19.49 ℃，中心根区夜间平均温度分别是 19.34 ℃、20.20 ℃、20.92 ℃。可知，白天和夜间 SR 中心温度始终高于外侧温度，SRSC-P 和 SRSC-W 白天外侧温度高于中心温度，夜间外侧温度低于中心温度，说明 SRSC 外侧土壤白天具有蓄集热量的作用。此外，由最高温度和最低温度出现的时间可知，SR、SRSC-P 和 SRSC-W 中心温度变化皆滞后于外侧温度变化，滞后时间分别为 1 h、2 h 和 3 h，SRSC-W 的滞后时间最长，说明其温度缓冲能力最强。



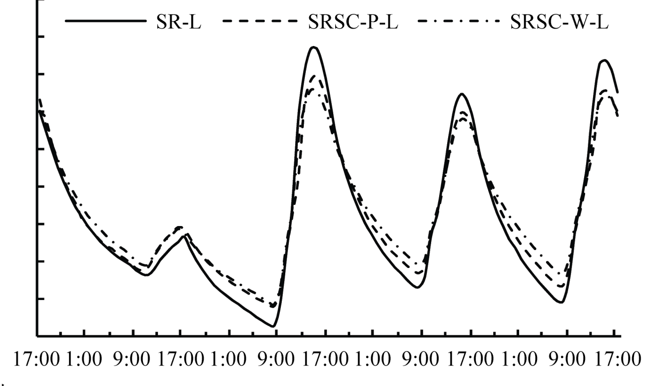


图 5 日光温室 3 种栽培模式垄中心(C)和外侧(L)温度差异

Fig. 5 Differences between center (C) and lateral (L) temperatures of three kinds of cultivation ridges in solar greenhouse

2.3.2 不同栽培模式根区南北向的温度差异

由图 6 可知 4 种栽培垄南部和北部中心温度差异，将温差大于 1 ℃定义为差异明显。SR、SRSC-P、NPG 和 SRSC-W 的南部中心根区平均最低温度分别为 16.60 ℃、17.19 ℃、17.71 ℃、17.78 ℃，北部中心根区平均最低温度分别为 16.78 ℃、18.10 ℃、18.73 ℃、18.58 ℃，可知北部中心根区温度比南部中心根区温度分别高 0.18 ℃、0.91 ℃、1.02 ℃、0.84 ℃，即北部根区中心最低温度普遍高于南部，除 SR 外，其他 3 种处理南北位置根区温度存在较大差异，其中 NPG 差异明显，SR 温差较小可能是由于其温度较低造成的，较为接近室内气温，而其他几种处理温差较大，既说明其具有维持根区高温的能力，又说明温室南北方向存在温度差。3 种处理南部中心根区平均最高温度分别为 28.50 ℃、26.76 ℃、30.65 ℃、26.94 ℃，北部中心根区平均最高温度分别为 30.65 ℃、28.38 ℃、30.98 ℃、26.58 ℃，可知北部中心根区最高温度比南部分别高 2.15 ℃、1.62 ℃、0.33 ℃、–0.36 ℃，SR 和 SRSC-P 南北最高温度温差较大，生产稳定性较差，而 NPG 虽然温差较小，但是南北部温度都较高，较为接近气温，其对高温的缓冲能力最差，SRSC-W 有较小的南北高温差，表现稳定。4 种处理南部中心根区白天平均温度分别为 22.21 ℃、21.06 ℃、22.76 ℃、21.27 ℃，北部中心根区白天温度分别为 22.28 ℃、22.06 ℃、23.12 ℃、21.28 ℃，可知北部中心根区白天平均温度分布比南部高 0.07 ℃、1.00 ℃、0.36 ℃、0.01 ℃。4 种处理南区中心根区夜间平均温度分别为 19.34 ℃、20.20 ℃、21.27 ℃、20.92 ℃，北区中心根区夜间平均温度分别为 20.15 ℃、21.87 ℃、22.45 ℃、21.06 ℃，可知北部中心根区夜间平均温度分布比南部高 0.81 ℃、1.67 ℃、1.18 ℃、0.14 ℃。SRSC-W 的白天和夜间时段的中心根区南北部平均温度差最小，可知其南北部温度在一天内较为稳定，将有利于作物的生长。

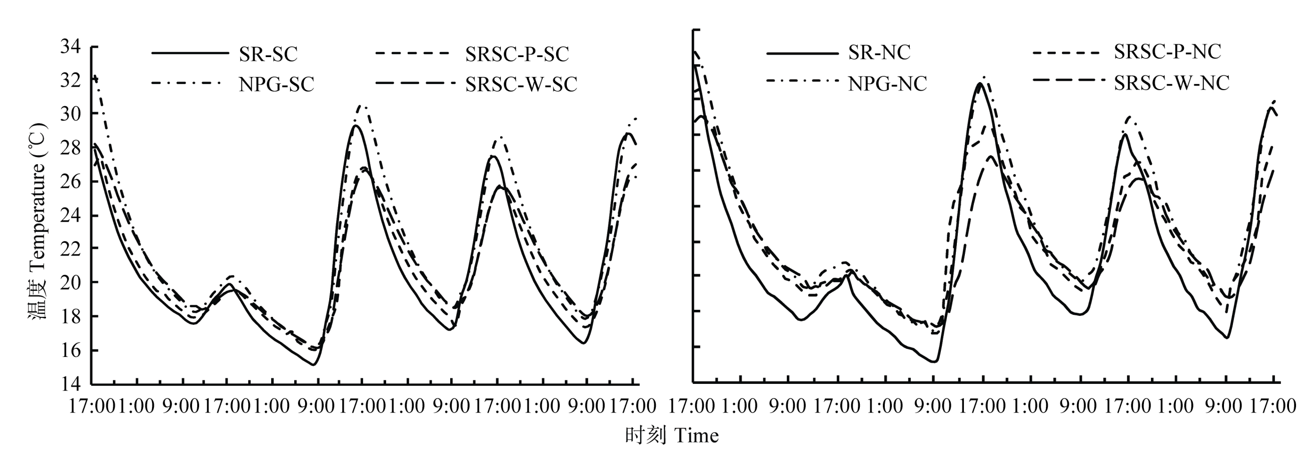


图 6　日光温室 4 种栽培垄南部(SC)和北部(NC)中心温度差异

Fig. 6　Differences in temperatures between south center (SC) and north center (NC) of four kinds of ridges in solar greenhouse

3　讨论与结论

本试验提出并建立了一种新的日光温室栽培方法, 即起垄内嵌式基质栽培方法(SRSC), 通过土壤起垄嵌槽或嵌膜, 槽和膜内空间装填栽培基质, 垄外覆膜后使用滴灌进行蔬菜无土栽培。该方法利用土壤较强的蓄热保温性能和温度缓冲性能, 能够有效维持低温环境下根区温度, 同时增强了基质温度变化的缓冲性; 利用栽培槽或塑料薄膜将基质与土壤隔离, 避免了土壤连作障碍和土壤盐渍化的发生, 生态环保; 采用水肥一体化的灌溉方式, 充分利用基质栽培和滴灌高产高效的优势, 节约水肥。

研究表明, 日光温室对温室内气温和栽培垄根区温度的提升较显著, 尤其是在夜间低温环境下效果更明显, 说明日光温室具有良好的增温效果, 这与强慧婷等[28]的研究结果一致; 此外, 栽培垄的温度变化滞后于温室内温度和外界环境温度, 说明土壤比热容大, 升温和降温较慢, 这与常丽娜等[29]的研究结果一致, 对根区加温的时间选择具有重要的指导意义。

研究表明, 虽然 NPG 具有良好的蓄热保温能力, 但其对高温缓冲能力较差, 温室白天中午时段根区温度过高, 也会阻碍根系生长[30−31], 且在夏季高温影响会更加明显; 相对的, 在低温和高温环境中, SRSC-W 缓冲低温和高温的能力都较强, 相对于传统的土壤起垄栽培, 其维持根区温度的能力更强, 这种作用对冬春季低温环境下维持较高根区温度是十分有利的, 此外, 其对夏季高温也有着较好的缓冲作用, 相关研究将会进一步进行。在夜间低温过程中, SRSC-W 的根区平均温度明显高于 SR, 并且高于 SRSC-P, 说明其对维持低温环境下的根区温度起着重要作用, 能够促进低温环境下作物的生长。

SRSC-W 能够显著维持和缓冲栽培垄根区温度的原因可能是由于土垄相对于水平土壤具有一定的角度及其良好的结构特点, 使其能够更多地接受太阳辐射, 白天土壤和基质蓄集了更多的太阳能, 尤其是具有一定含水量的基质能够吸收更多的热量; 在夜间, 土垄蓄集的热量会逐渐释放出来, 基质中的热量由于有土壤的包被和地膜的覆盖释放缓慢, 中心温度会相对较高。阴天条件下, 栽培垄根区温度始终高于室内温度, 且栽培垄温度低于晴天条件下同一时段的温度, 说明阴天条件下室内温度得不到有效提升, 会影响栽培垄的蓄热。

刘淑梅等[32]研究认为, 日光温室中温度分布存在空间差异性。本研究结果显示, 在各栽培垄南北方向上, 北部根区温度高于南部, 这对作物栽培及根区温度调控具有一定的指导意义。SR 的白天和夜间的中心根区温度总是高于外侧, 但 SRSC-P 和 SRSC-W 白天外侧温度高, 夜间中心温度高, 说明 SRSC 外侧土壤具有白天蓄热和夜间保温的效果, 这也是其能够维持根区较高温度的原因。此外, SRSC-W 栽培模式的中心根区南北温差相对于其他处理最小, 能够为作物根系生长提供更加稳定的根区温度环境。研究发现, SRSC-W 中心根区温度变化相对于外侧温度变化的滞后时间最长, 说明其对温度缓冲性最强。

总之, 日光温室显著提高了冬春季作物根区环境温度, 这对我国北方冬春季蔬菜生产的贡献是巨大的。而针对日光温室生产过程中存在的低温胁迫问题, 本文提出的 SRSC-W 栽培方法维持低温环境下根区较高温度的能力最强, 且在环境出现高温时能够缓冲根区高温的能力也最强, 增强了作物根区的蓄热保温性能和温度缓冲性能, 与其他栽培模式相比具有优势, 且支撑材料相对 PE 基质栽培槽廉价,

实用性更强。此外，本 SRSC-W 还发挥了无土栽培高产、高效环保和滴灌节约水肥的优势，能够有效解决土壤质量恶化和水肥利用率低等资源环境问题，综合效益突出。

参考文献 References

[1] 秦巧燕，贾陈忠，曲东，等. 我国设施农业发展现状及施肥特点[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(4): 373–376
Qin Q Y, Jia C Z, Qu D, et al. Advances and characters of fertilizer application of protected field agriculture in China[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2002, 22(4): 373–376

[2] 孙光闻，陈日远，刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报, 2005, 21(14): 184–188
Sun G W, Chen R Y, Liu H C. Causes and control measures for continuous cropping obstacles in protected vegetable cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(14): 184–188

[3] 陈青云. 日光温室的实践与理论[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 343–350
Chen Q Y. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 343–350

[4] Dodd I C, He J, Turnbull C G N, et al. The influence of supra optimal root-zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L.[J]. Journal of Expermental Botany, 2000, 51(343): 239–248

[5] 陈端生. 中国节能型日光温室的理论和实践[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 22–26
Chen D S. Theory and practice of energy saving solar greenhouse in China[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 22–26

[6] 刘圣勇，张杰，张百良，等. 太阳能蓄热系统提高温室地温的试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 461–465
Liu S Y, Zhang J, Zhang B L, et al. Experimental study of solar thermal storage for increasing the earth temperature of greenhouse[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(4): 461–465

[7] 李萍萍，胡永光. 冬季塑料大棚多重覆盖及电加热增温效果研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 76–79
Li P P, Hu Y G. Thermal preservation effect of multi-film covering and heating wire in plastic greenhouses in winter[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 76–79

[8] 孙维拓，杨其长，方慧，等. 主动蓄放热–热泵联合加温系统在日光温室的应用[J]. 农业工程学报，2013，29(19): 168–177
Sun W T, Yang Q C, Fang H, et al. Application of heating system with active heat storage-release and heat pump in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 168–177

[9] 王双喜，马春生，张静，等. 节能温室太阳能土壤蓄热加温系统的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 197–203
Wang S X, Ma C S, Zhang J, et al. Substrate heating system with solar energy for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 197–203

[10] Lament W J Jr. Plastic mulches for the production of vegetable crops[J]. Horticulture Technology, 1993, 3(1): 35–39

[11] 冯玉龙，刘恩举，孙国斌. 根系温度对植物的影响(Ⅰ)——根温对植物生长及光合作用的影响[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(3): 63–69
Feng Y L, Liu E J, Sun G B. Influence of temperature of root system on plant (Ⅰ) — Influence of root temperature on plant growth and photosynthesis[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(3): 63–69

[12] 冯玉龙，刘恩举，孟庆超. 根系温度对植物的影响(Ⅱ)——根温对植物代谢的影响[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(4): 94–99
Feng Y L, Liu E J, Meng Q C. Influence of temperature of root system on plant (Ⅱ) — Influence of root temperature on plant metabolism[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(4): 94–99

[13] 宋敏丽，温祥珍，李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258–2264
Song M L, Wen X Z, Li Y L. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2258–2264

[14] Ambebe T F, Dang Q L, Li J L. Low soil temperature inhibits the effect of high nutrient supply on photosynthetic response to elevated carbon dioxide concentration in white birch seedlings[J]. Tree Physiology, 2009, 30(2): 234–243

[15] Nxawe S, Laubscher C P, Ndakidemi P A. Effect of regulated irrigation water temperature on hydroponics production of spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(12): 1442–1446

[16] 任志雨，王秀峰. 根区温度对作物生长和生理代谢的影响综述[J]. 天津农学院学报, 2003, 10(2): 32–36
Ren Z Y, Wang X F. Effects of root zone temperature on growth and physiological metabolism of crop[J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 2003, 10(2): 32–36

[17] Martínez F, Lazo Y O, Fernández-Galiano J M, et al. Root respiration and associated costs in deciduous and evergreen species of *Quercus*[J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(10): 1271–1278

[18] Kaufmann M R. Leaf water stress in Engelmann spruce influence of the root and shoot environments[J]. Plant Physiology, 1975, 56(6): 841–844

[19] Gosselin A, Trudel M J. Root-zone temperature effects on pepper[J]. Journal of the American Society Horticultural Science, 1986, 111(2): 220–224

[20] Jones D A G, Sandwell I, Talent C J W. The effect of soil temperature when associated with low air temperatures on the cropping of early tomatoes[J]. Acta Horticulturae, 1978, 76: 167–171

[21] 任志雨，王秀峰，魏珉，等. 不同根区温度对黄瓜幼苗生长及光合参数的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2003, 34(1): 64–67
Ren Z Y, Wang X F, Wei M, et al. Effects of different root zone temperature on growth and photosynthetic parameters of cucumber seedlings[J]. Journal of Shandong Agricultural

University: Natural Science, 2003, 34(1): 64–67
[22] Nilelsen K F. Roots and root temperature[M]//Carson E W. The Plant Root and its Environment. Charlottesville, VA: The University Press of Virginia, 1974: 293–295
[23] 张英，徐建华，李万良．无土栽培的现状及发展趋势[J]．农业科技展望, 2008, 4(5): 40–42
Zhang Y, Xu J H, Li W L. The present situation and development trend of soilless culture[J]. Agricultural Outlook, 2008, 4(5): 40–42
[24] 郝永娟，刘春艳，王勇，等．设施蔬菜连作障碍的研究现状及综合调控[J]．中国农学通报, 2007, 23(8): 396–398
Hao Y J, Liu C Y, Wang Y, et al. Present condition of research and integrated control on replant disease in greenhouse vegetable[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 396–398
[25] Borelli Z. Effect of different irrigation methods and levels on greenhouse musk melon[J]. Acta Horticulturae, 1977, 58: 129–135
[26] 朱秋颖，李振东，尚玲玲，等．黄瓜地面覆盖对日光温室土壤温度变化的影响[J]．中国蔬菜, 2012(22): 41–46
Zhu Q Y, Li Z D, Shang L L, et al. Effects of soil surface mulching on cucumber soil temperature in solar greenhouse[J]. China Vegetables, 2012(22): 41–46
[27] 周茂娟，梁银丽，陈甲瑞，等．地表处理方式对日光温室辣椒水分利用效率及土壤硝态氮、速效磷分布的影响[J]．应用生态学报, 2007, 18(6): 1393–1396
Zhou M J, Liang Y L, Chen J R, et al. Effects of soil covering on solar greenhouse pepper water use efficiency and soil nitrate N and available phosphorus contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1393–1396
[28] 强慧婷，李胜云，欧阳源源，等．南京地区日光温室的土壤温度变化特征[J]．江苏农业科学, 2012, 40(7): 347–349
Qiang H T, Li S Y, Ouyang Y Y, et al. Variation characteristics of soil temperature in solar greenhouse in Nanjing area[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 347–349
[29] 常丽娜，张林华．日光温室空气温度与土壤温度的相关性分析[J]．山东建筑大学学报, 2010, 25(6): 595–598
Chang L N, Zhang L H. Correlation analysis of air and soil temperature in solar greenhouse[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(6): 595–598
[30] Lee S, Cheong S. Inducing head formation of iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the tropics through rootzone temperature control[J]. Tropical Agriculture, 1996, 73(1): 34–42
[31] He J, Lee S K. Growth and photosynthetic responses of three aeroponically grown lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.) to different rootzone temperatures and growth irradiances under tropical aerial conditions[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 1998, 73: 173–180
[32] 刘淑梅，薛庆禹，李春．下沉式日光温室气温和土温时空变化特征研究[J]．天津农业科学, 2013, 19(5): 53–57
Liu S M, Xue Q Y, Li C. Study on spatiotemporal variation of air temperature and soil temperature in typical solar greenhouse in Tianjin area[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2013, 19(5): 53–57